

19



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Offic européen des brevets

11 Veröffentlichungsnummer:

**0 262 346
A1**

12

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

21 Anmeldenummer: 87111422.9

51 Int. Cl.4: **H01L 29/90**, **H01L 29/165**,
H01L 29/161

22 Anmeldetag: 07.08.87

30 Priorität: 27.09.86 DE 3632921
30.07.87 DE 3725214

43 Veröffentlichungstag der Anmeldung:
06.04.88 Patentblatt 88/14

84 Benannte Vertragsstaaten:
DE FR GB

71 Anmelder: Licentia Patent-Verwaltungs-GmbH
Theodor-Stern-Kai 1
D-6000 Frankfurt/Main 70(DE)

72 Erfinder: Jorke, Helmut, Dipl.Phys.
Böhmenstrasse 76
D-7929 Gerstetten(DE)
Erfinder: Luy, Johann-Friedrich, Dipl.-Ing.
Schermarweg 3
D-7900 Ulm(DE)

74 Vertreter: Schulze, Harald Rudolf, Dipl.-Ing. et
al
Licentia Patent-Verwaltungs-GmbH
Theodor-Stern-Kai 1
D-6000 Frankfurt/Main 70(DE)

54 **IMPATT-Diode.**

57 Auf einem Si-Substrat (1) ist eine Si-SiGe-Heterostruktur aufgewachsen. Die SiGe-Schicht (2) befindet sich vorzugsweise in der Generationszone der IMPATT-Diode. Anstatt der SiGe-Schicht (2) ist es außerdem möglich, ein Si/SiGe-Übergitter aufzuwachsen.

EP 0 262 346 A1

"IMPATT-Diode"

Die Erfindung betrifft eine IMPATT-Diode nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

IMPATT-Dioden sind leistungsfähige Millimeterwellenbauelemente. Sie werden insbesondere zur Erzeugung von Schwingungen benützt.

Die Lawinenvervielfachung durch Stoßionisation und die Bewegung der Ladungsträger durch einen Laufräum können zusammen einen negativen Widerstand ergeben. Eine zur Erzeugung und Kombination dieser Mechanismen geeignete Struktur ist z.B. ein p-n-Übergang.

Durch die Benutzung eines Heteroüberganges anstatt eines p-n-Überganges läßt sich die erforderliche Spannung für den Lawinendurchbruch der IMPATT-Diode reduzieren. Die Heterostruktur der IMPATT-Diode muß so aufgebaut sein, daß das Halbleitermaterial der Generationszone (Lawinendurchbruchzone) einen kleineren Bandabstand besitzt als das der Driftzone. Dadurch wird die Ionisationsschwellenenergie erniedrigt und damit der Wirkungsgrad der IMPATT-Diode erhöht.

Die vorbekannten Lösungen haben jedoch den Nachteil, daß durch die verwendeten Halbleitermaterialien der Wirkungsgrad der IMPATT-Diode für z.B. eine Frequenz von 80 GHz unter 10% liegt und der Wellenlängenbereich auf den mm-Bereich beschränkt ist. Außerdem ist die Verwendung von kostengünstigen Si-Substraten nur eingeschränkt möglich.

Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, eine IMPATT-Diode mit Heterostruktur anzugeben, die kostengünstig herstellbar ist, die einen hohen Wirkungsgrad besitzt und deren Wellenlängenbereich den mm- und sub-mm-Bereich umfaßt.

Diese Aufgabe wird gelöst durch die im kennzeichnenden Teil des Patentanspruch 1 angegebenen Merkmale. Vorteilhafte Ausgestaltungen und/oder Weiterbildungen sind den Unteransprüchen entnehmbar.

Die Erfindung hat den Vorteil, daß die IMPATT-Diode mit einem kostengünstigen Si-Substrat hergestellt ist und ihr Wirkungsgrad durch eine geeignete Si/SiGe-Heterostruktur verbessert wird.

Die Erfindung wird im folgenden anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert unter Bezugnahme auf schematische Zeichnungen.

Fig. 1 zeigt den Aufbau einer Einfach-Heterostruktur-IMPATT-Diode.

Fig. 2 zeigt den Aufbau einer Doppel-Heterostruktur-IMPATT-Diode.

Fig. 3 zeigt das Energiebandschema für ein Si/Si_{0,2}Ge_{0,8}-Übergitter

Gemäß Fig. 1 ist auf einem p⁺-dotierten Si-Substrat 1 mit einer Ladungsträgerkonzentration von mehr als 10¹⁹ cm⁻³ eine Halbleiterschichtenfolge aus

- 5 -einer undotierten SiGe-Schicht 2 mit einer Schichtdicke von ungefähr 0,02 µm,
- einer n-dotierten Si-Schicht 3 mit einer Ladungsträgerkonzentration von ungefähr 1,4•10¹⁷ cm⁻³ und einer Schichtdicke von etwa 0,3 µm,
- 10 -einer n⁺-dotierten Si-Schicht mit einer Ladungsträgerkonzentration von ungefähr 5•10¹⁹ cm⁻³ und einer Schichtdicke von etwa 0,1 µm aufgebracht.

Die Bezeichnung "+" bedeutet starke Dotierung. Dotiermaterialien für die n-Dotierung sind z.B. Sb, P, As und für die p-Dotierung B, Ga, Al, In.

An die Struktur gemäß Fig. 1 wird eine so hohe Sperrspannung angelegt, daß sich die Sperrschicht über die Halbleiterschichten 2, 3 erstreckt. An der Grenze zwischen p⁺-dotiertem Si-Substrat 1 und SiGe-Schicht 2 ist die maximale Feldstärke so groß, daß Stoßionisation einsetzt.

Der Halbleiterschichtaufbau einer IMPATT-Diode gemäß Fig. 1 unterscheidet sich von einer IMPATT-Diode auf Si-Basis mit p-n-Übergang dadurch, daß eine SiGe-Schicht 2 an der Stelle aufgewachsen ist, an der die zur Stoßionisation und damit die zur Lawinmultiplikation erforderliche Feldstärke auftritt. Vorteilhafterweise besitzt SiGe einen kleineren Bandabstand E_g als Si (E_g = 1,12 eV) damit eine niedrigere Ionisationsschwellenenergie als Si. Für eine 0,02 µm dicke Si_{0,6}Ge_{0,4}-Schicht beträgt der Bandabstand E_g = 0,76 eV.

Weiterhin wird durch die unterschiedlichen Gitterkonstanten von Si und SiGe eine laterale mechanische Spannung in den Halbleiterschichten erzeugt. Wird z.B. auf einem Si-Substrat 1 eine Si_{0,6}Ge_{0,4}-Schicht 2 mit einer unterkritischen Schichtdicke von etwa 0,02 µm abgeschieden, so entsteht in der SiGe-Schicht eine laterale Druckspannung, da die natürliche Gitterkonstante von einkristallinem SiGe größer ist als die von einkristallinem Si. Eine Schichtdicke bezeichnet man als unterkritisch, wenn die aus verschiedenen Halbleitermaterialien bestehende Schichten in lateraler Richtung die gleiche Gitterkonstante besitzen. Es liegt dann ein pseudomorphes Wachstum vor. Die Druckspannung bewirkt eine Stauchung der SiGe-Schicht bis zu 4%. Die durch das pseudomorphe Wachstum entstandene mechanische Spannung führt zu einer Reduzierung des Bandabstandes von SiGe und bewirkt eine zusätzliche Senkung der Ionisationsschwellenenergie von SiGe.

Im Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 2 ist eine IMPATT-Diode mit einer Doppel-Heterostruktur angegeben. Die Doppel-Heterostruktur unterscheidet sich beispielsweise von der Einfach-Heterostruktur (Fig. 1) durch eine weitere p-dotierte Si-Schicht 5, die zwischen p⁺-dotiertem Substrat 1 und undotierter SiGe-Schicht 2 aufgewachsen ist (Fig. 2). Die Si-Schicht 5 besitzt eine Schichtdicke von ungefähr 0,25 μm und eine positive Ladungsträgerkonzentration von etwa $1,6 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Das Substrat 1 und die Halbleiterschichten 2, 3, 4 sind bezüglich der Schichtdicke und Schichtzusammensetzung analog Ausführungsbeispiel 1 gewählt. Die durch die unterschiedliche Gitterkonstante von Si und SiGe verursachte mechanische Spannung in der SiGe-Schicht bewirkt vorteilhafterweise eine Verringerung des Bandabstandes in der SiGe-Schicht und eine Erniedrigung der Ionisationsschwellenenergie.

Die höhere Ionisationsrate von SiGe hat den Vorteil, daß der räumliche Bereich, in dem Verlustleistung auftritt, verkleinert wird und der Wirkungsgrad der IMPATT-Diode vergrößert wird. Der Wirkungsgrad der Heterostruktur-IMPATT-Dioden gemäß der Erfindung liegt für eine Frequenz von 100GHz zwischen 12 bis 15 %.

Zur Erhöhung des Wirkungsgrades der gattungsgemäßen IMPATT-Diode ist es außerdem vorteilhaft, die Generationszone als undotiertes Si/SiGe-Übergitter auszubilden. In einem Si/SiGe-Übergitter mit geeigneter Periodenlänge kann bei gleicher Schichtdicke wie für eine SiGe-Einzelschicht, der Ge-Anteil x in den $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ -Schichten des Übergitters größer gewählt werden als in einer entsprechenden $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ -Einzelschicht. Durch die Erhöhung des Ge-Anteils x der $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ -Schichten und durch optimale Gestaltung der Periodenlänge des Si/SiGe-Übergitters läßt sich ein Miniband 6 im Energiebandschema des Si/SiGe-Übergitters (Fig. 3) erzeugen, dessen Bandabstand zum Leitungsband E_c kleiner ist als der Bandabstand zwischen Valenz- und Leitungsband einer SiGe-Einzelschicht mit gleicher Schichtdicke. Beispielsweise betragen für eine $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ -Einzelschicht mit einer Schichtdicke von 0,02 μm der maximale Ge-Anteil $x = 0,4$ und der entsprechende Bandabstand $E_g = 0,76\text{eV}$. Für ein symmetrisches Si/Si_{1-x}Ge_x-Übergitter mit einer Schichtdicke von 0,02 μm , das aus einer Anzahl von fünf Perioden mit der Periodenlänge $1 = 0,004 \mu\text{m}$ aufgebaut ist, betragen der maximale Ge-Anteil $x = 0,8$ und der entsprechende Bandabstand $E_g = 0,6\text{eV}$ (Fig. 3). Bei einem symmetrischen Übergitter haben alle Einzelschichten des Übergitters die gleiche Schichtdicke.

Die kritische Schichtdicke des Si/Si_{1-x}Ge_x-Übergitters ist bei gleichem Ge-Anteil x größer als bei einer $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ -Einzelschicht. Dadurch kann die Schichtdicke der Generationszone bei Verwendung

eines Si/SiGe-Übergitters größer gewählt werden als für eine SiGe-Einzelschicht. Das hat den Vorteil, daß die Übergitter-IMPATT-Diode über einen weiteren Frequenzbereich einsetzbar ist als die entsprechende Heterostruktur-IMPATT-Diode mit lediglich einer SiGe-Schicht.

Der Wellenlängenbereich der erfindungsgemäßen IMPATT-Dioden liegt im mm- und sub-mm-Bereich.

Die Heterostruktur-Halbleiterschichtenfolge der erfindungsgemäßen IMPATT-Dioden wird mit dem Molekularstrahl-Epitaxie-Verfahren erzeugt.

Die Erfindung ist nicht auf die angegebene p⁺inn⁺-oder p⁺pinn⁺-Struktur der IMPATT-Dioden beschränkt, sondern sie ist auch auf die inversen Strukturen anwendbar, die dadurch entstehen, daß in den Ausführungsbeispielen der Leitungstyp der Halbleiterschichten vertauscht wird (n-Leitung wird durch p-Leitung ersetzt und umgekehrt). Weiterhin sind nicht nur die angegebenen Quasi-Read-Strukturen für die erfindungsgemäßen IMPATT-Dioden geeignet, sondern die Erfindung ist auch für Misawa-Dioden anwendbar.

Ansprüche

1. IMPATT-Diode, bestehend aus einem einkristallinen Si-Substrat, auf dem eine Heterostruktur-Halbleiterschichtenfolge aufgebracht ist, die eine alternierende Anordnung von mindestens zwei unterschiedlichen Halbleiterschichten besitzt, die zumindest einen Heteroübergang bilden, dadurch gekennzeichnet, daß die Generationszone der IMPATT-Diode mindestens eine SiGe-Schicht (2) enthält.

2. IMPATT-Diode nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß auf dem p⁺-Si-Substrat (1) eine Heterostruktur-Halbleiterschichtenfolge aus
-einer undotierten SiGe-Schicht(2),
-einer n-dotierten Si-Schicht(3),
-einer n⁺-dotierten Si-Schicht(4) aufgewachsen ist.

3. IMPATT-Diode nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß auf dem p⁺-Substrat (1) eine Heterostruktur-Halbleiterschichtenfolge aus
-einer p-dotierten Si-Schicht(5),
-einer undotierten SiGe-Schicht(2),
-einer n-dotierten Si-Schicht(3),
-einer n⁺-dotierten Si-Schicht(4) aufgewachsen ist.

4. IMPATT-Diode nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Generationszone der IMPATT-Diode derart ausgebildet ist, daß anstatt der undotierten SiGe-Schicht (2) ein undotiertes Si/SiGe-Übergitter aufgewachsen ist.

5. IMPATT-Diode nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß in der Heterostruktur-Halbleiterschichtenfolge eine

vorherbestimmbare Spannungsverteilung entsteht, die zu einer Verringerung des Bandabstandes der Halbleitermaterialien führt, die die Generationszone bilden.

6. IMPATT-Diode nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Heterostruktur-Halbleiterschichtenfolge sowie deren Dotierung durch ein Molekularstrahl-Epitaxie Verfahren erzeugt werden. 5

7. IMPATT-Diode nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß bei der Heterostruktur-Halbleiterschichtenfolge jeweils der Leitungstyp der entsprechenden Halbleiterschichten invertiert ist. 10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

4

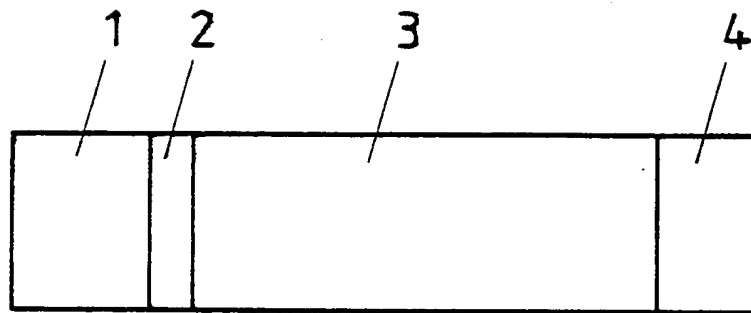


FIG. 1

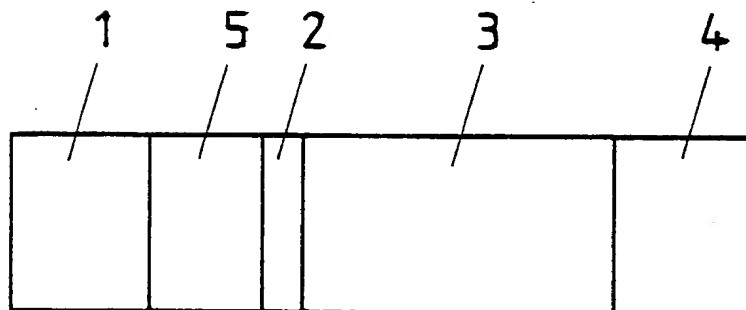


FIG. 2

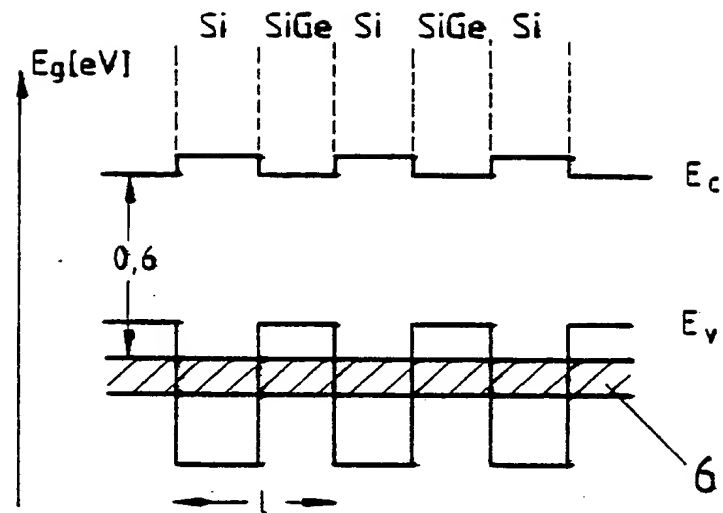


FIG. 3



Europäisches
Patentamt

EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung

EP 87 11 1422

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (Int. Cl.4)
Y	US-A-3 466 312 (SEIDEL) * Spalte 2, Zeilen 7-28; Spalte 9, Zeile 54 - Spalte 10, Zeile 22; Figuren 4-5A *	1,4-7	H 01 L 29/90 H 01 L 29/165 H 01 L 29/161
A	---	2	
Y	APPLIED PHYSICS LETTERS, Band 47, Nr. 12, Dezember 1985, Seiten 1333-1335, Woodbury, New York, US; D.V. LANG et al.: "Measurement of the band gap of GexSi1-x/Si strained-layer heterostructures" * Seite 1333, Spalte 1, Zeilen 24-34; Figuren 1,3 *	1,4-7	
A	Idem	2	
A	FR-A-2 225 842 (THOMSON-CSF) * Seite 3, Zeilen 3-6; Figur 4 *	2	
A	US-A-4 291 320 (WEN et al.) * Spalte 3, Zeilen 11-17; Figur 2 *	1,3,7	RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (Int. Cl.4)
A	PHYSICAL REVIEW B, Band 32, Nr. 2, 15. Juli 1985, Seiten 1405-1408, The American Physical Society, New York, US; R. PEOPLE: "Indirect band gap of coherently strained GexSi1-x bulk alloys on [001] silicon substrates" * Insgesamt *	5	H 01 L
A	US-A-4 529 455 (BEAN et al.) * Insgesamt *	6	
	---	-/-	
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort DEN HAAG		Abschlußdatum der Recherche 17-12-1987	Prüfer MORVAN D.L.D.
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE			
X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur			
T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus andern Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument			

EPO FORM 1503 03.82 (P0403)



EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (Int. Cl.4)
A	SOLID STATE TECHNOLOGY, Band 28, Nr. 10, Oktober 1985, Seiten 137-143, Port Washington, New York, US; K.L. WANG: "Novel devices by Si-based molecular beam epitaxy" * Figur 6 *	6	
A	PROCEEDINGS OF THE IEEE, Band 61, Nr. 5, Mai 1973, Seiten 666-667, IEEE, New York, US; D.H. LEE: "Low-frequency noise of ion-implanted double-drift IMPATT diodes" * Figur 1 *	1-3,7	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (Int. Cl.4)
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort DEN HAAG		Abschlußdatum der Recherche 17-12-1987	Prüfer MORVAN D.L.D.
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE			
X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : nichtschriftliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus andern Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

EPO FORM 1503 03.82 (10/90)